

Die Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe

---

WS 2019  
DR. DIETER MÜLLER

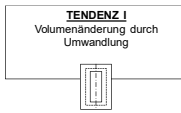
Inhalt Block 4

2.10 Verzug  
**2.10.1 EIGENSINNUNGEN UND DEREN URSACHEN**

2.10.2 Maßänderung infolge von Wärmebehandlung  
2.10.3 Formänderung und deren mögliche Ursachen  
2.11 Härten unter Formzwang  
2.12 Thermisches Randschichthärten  
2.12.1 Flammhärten  
2.12.2 Induktionshärten  
2.12.3 Laserstrahlhärten  
2.12.4 Elektronenstrahlhärten

Die drei Tendenzen des Verzuges

**TENDENZ I**  
Volumenänderung durch Umwandlung



Die drei extremen Tendenzen des Verzuges  
..... Ausgangskontur eines Zylinders  
—— Endform

nach Wypss, 1984

Inhalt Block 4

**2.10 VERZUG**

2.10.1 Eigenspannungen und deren Ursachen  
2.10.2 Maßänderung infolge von Wärmebehandlung  
2.10.3 Formänderung und deren mögliche Ursachen  
2.11 Härten unter Formzwang  
2.12 Thermisches Randschichthärten  
2.12.1 Flammhärten  
2.12.2 Induktionshärten  
2.12.3 Laserstrahlhärten  
2.12.4 Elektronenstrahlhärten

Eigenspannungen

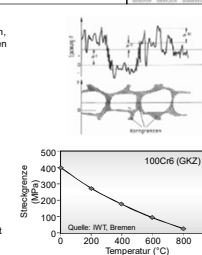
**Definition (nach Machrauch)**  
Eigenspannungen sind mechanische Spannungen, die in einem Körper herrschen, an dem keine äußeren Kräfte und Momente angreifen und der sich im thermischen Gleichgewicht befindet.

**Eigenspannungen I. Art**  
sind über größere Werkstoffbereiche (mehrere Körner) nahezu homogen und über ein komplettes Bauteil im Gleichgewicht. Bei Eingriffen in das System treten Maßänderungen auf.

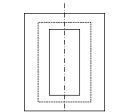
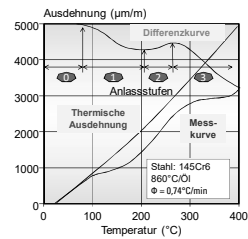
**Eigenspannungen II. Art**  
sind über kleine Werkstoffbereiche (ein bis mehrere Körner) homogen. Bei Eingriffen in das System können Maßänderungen auftreten.

**Eigenspannungen III. Art**  
sind über kleinste Werkstoffbereiche inhomogen. Bei Eingriffen in das System treten keine Maßänderungen auf (z.B. Versetzungen).

**Warum sind Eigenspannungen kritisch bei der Wärmebehandlung?**  
Werden unter Eigenspannung stehende Teile erwärmt, und ist die Höhe der Eigenspannungen höher als die temperaturabhängige Streckgrenze, dann kommt es beim Erreichen der entsprechenden Temperatur zu einem Spannungsabbau durch plastisches Fließen, was eine Verformung zur Folge hat.



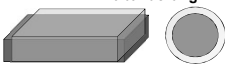
Beispiel für Tendenz I: Anlassen von Martensit

nach Diss. Clausmeyer, 1984, TU Darmstadt

Begriffsbestimmung - Verzug


**Maßänderung**



Änderung von Längenmaßen  
Ursache: Physikalische Volumenänderung  
Nicht vermeidbar

**Ermittlung:**  
Bestimmung von Elementen (Linie, Kreis ...) vor und nach Wärmebehandlung → Differenzbildung

**Formänderung**



Änderung von Winkelbeziehungen und Krümmungen  
Ursache: System, Prozesskette  
Bedingt vermeidbar

**Ermittlung:**  
Bestimmung der Form vor und nach der Wärmebehandlung → Differenzbildung

**Härter-Sprichwort: „Was nicht krumm ist, ist auch nicht hart!“**

Nach einer FVA-Auswertung betragen in vielen Industrieunternehmen die verzugsbedingten Kosten ca. 4% des Umsatzes

Inhalt Block 4

2.10 Verzug  
2.10.1 Eigenspannungen und deren Ursachen  
**2.10.2 MASSÄNDERUNG INFOLGE VON WÄRMEBEHANDLUNG**

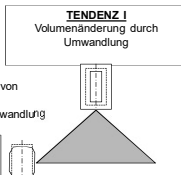
2.10.3 Formänderung und deren mögliche Ursachen  
2.11 Härten unter Formzwang  
2.12 Thermisches Randschichthärten  
2.12.1 Flammhärten  
2.12.2 Induktionshärten  
2.12.3 Laserstrahlhärten  
2.12.4 Elektronenstrahlhärten

Die drei Tendenzen des Verzuges

**TENDENZ I**  
Volumenänderung durch Umwandlung

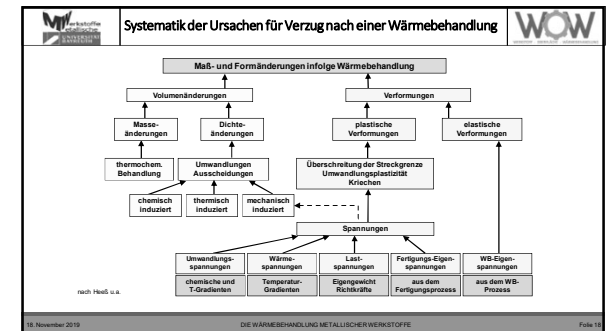
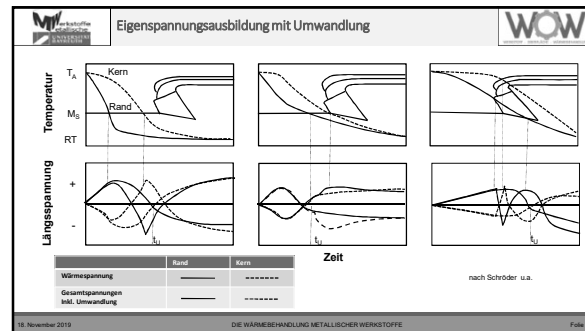
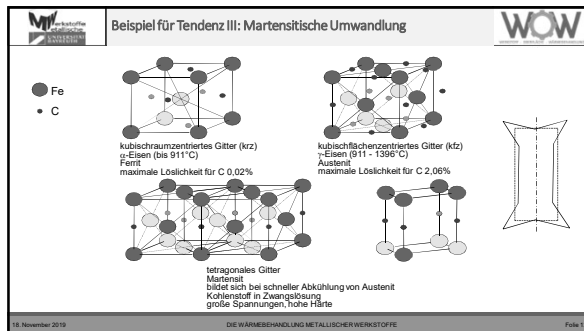
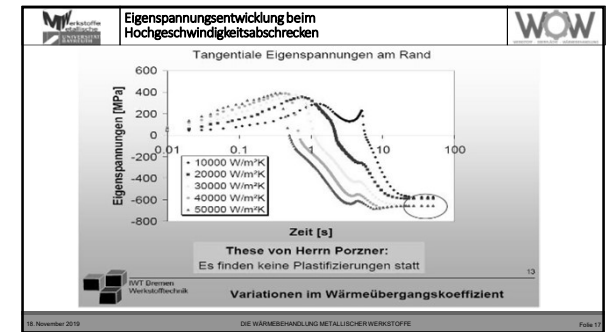
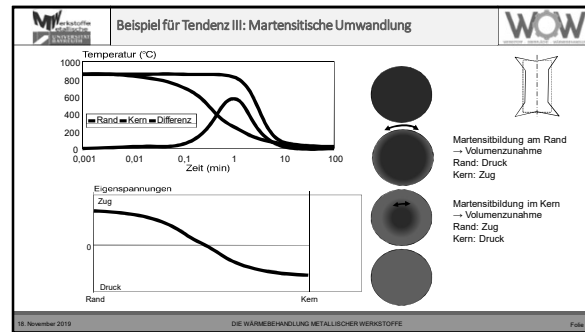
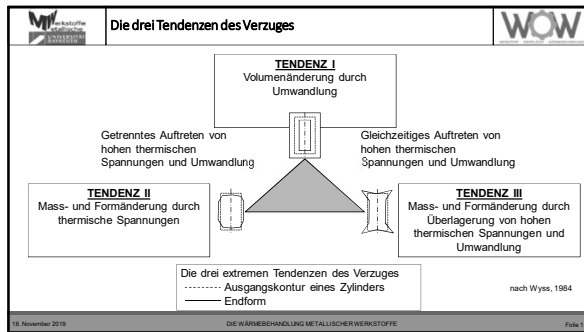
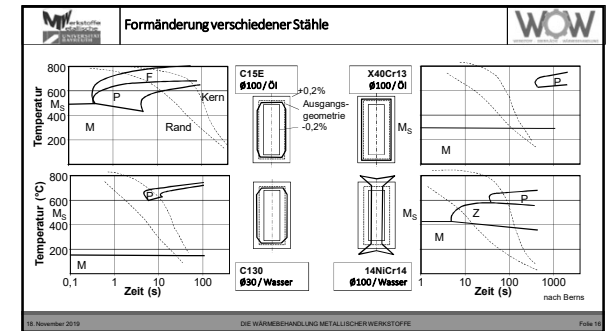
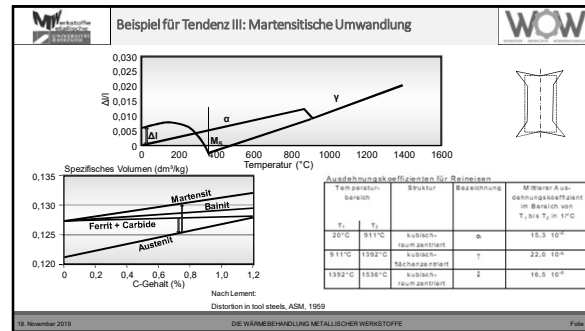
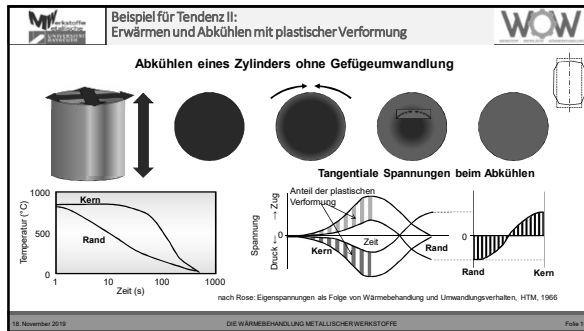
Getrenntes Auftreten von hohen thermischen Spannungen und Umwandlung

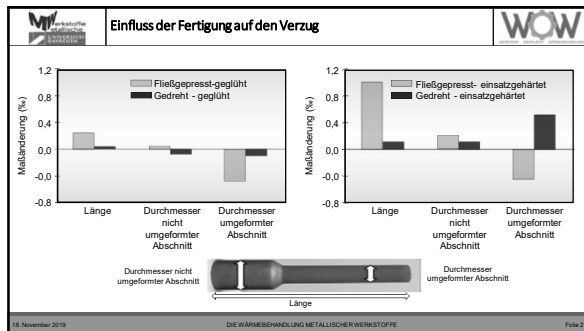
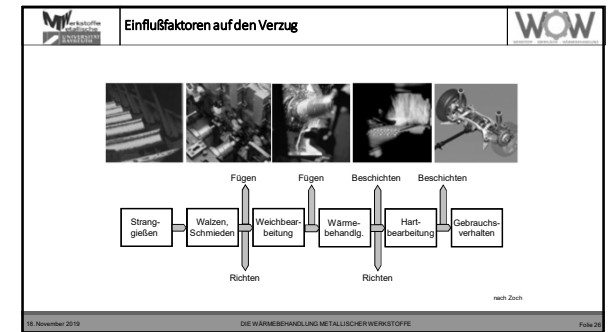
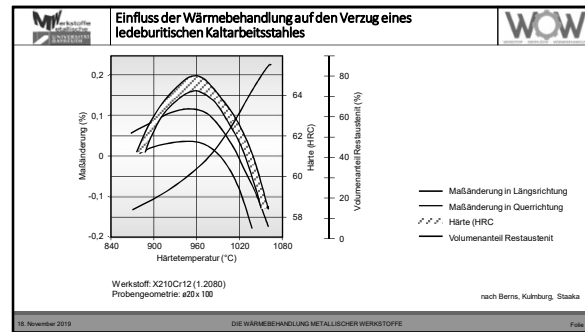
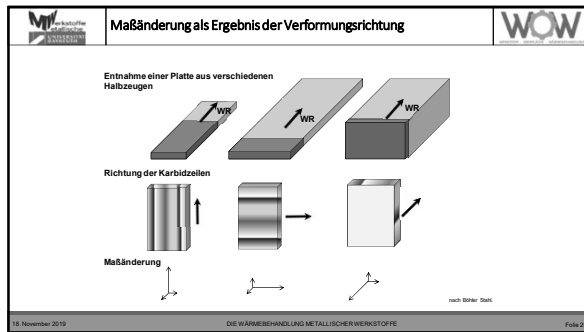
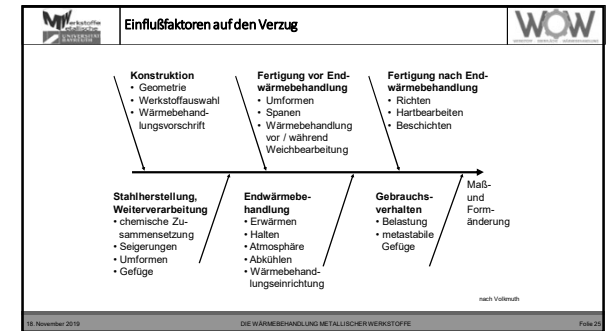
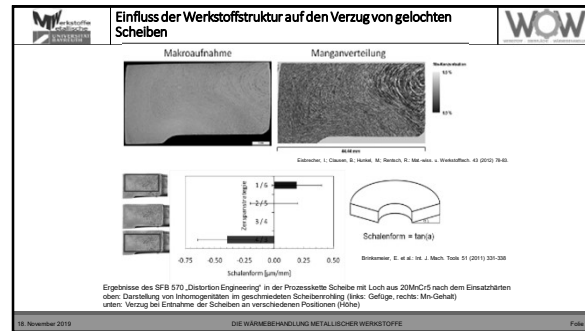
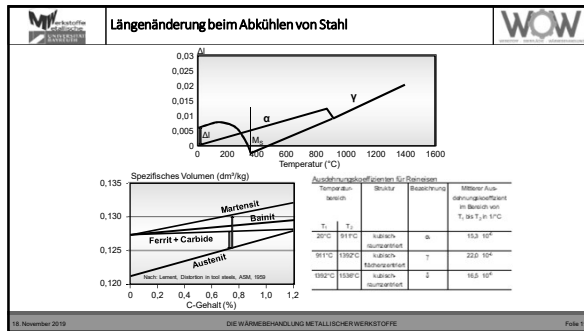
**TENDENZ II**  
Mass- und Formänderung durch thermische Spannungen



Die drei extremen Tendenzen des Verzuges  
..... Ausgangskontur eines Zylinders  
—— Endform

nach Wypss, 1984





- ### Inhalt Block 4
- 2.10 Verzug
    - 2.10.1 Eigenspannungen und deren Ursachen
    - 2.10.2 Maßänderung infolge von Wärmebehandlung
  - 2.10.3 FORMÄNDERUNG UND DEREN MÖGLICHE URSACHEN**
  - 2.11 Härten unter Formzwang
  - 2.12 Thermisches Randschichthärtens
    - 2.12.1 Flammhärtens
    - 2.12.2 Induktionshärtens
    - 2.12.3 Laserstrahlhärtens
    - 2.12.4 Elektronenstrahlhärtens
18. November 2019 | DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE | Folie 24

- ### Ursachen und Abhilfemaßnahmen für wärmebehandlungsbedingten Verzug
- Ursachen für Härteverzüge
- Bereits vor der Wärmebehandlung vorhandene Spannungen
  - Hohe Temperaturgradienten am Bauteil während der Erwärmung und Abkühlung
  - Unsymmetrische Temperaturverteilung
- Minimieren lassen sich Verzüge durch
- wärmebehandlungsgerechte Konstruktion (z.B. Masseverteilung, Radien)
  - Abbau der Material- und Bearbeitungsspannungen durch Spannungsarmglühen nach der Grobzerspannung
  - Fachgerechte Wärmebehandlung
    - An die Geometrie angepasste Chargierung
    - Abschrecken so schroff wie nötig, aber so mild wie möglich
18. November 2019 | DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE | Folie 27

**Wärmebehandlungsgerechte Konstruktion**

**Gleichmäßige Masseverteilung!**

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 29

**Werkstoffbedingte Formänderung**

Beispiel: gehärtete Leiste ist verzogen

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 31

**Einfluß des Chargierens auf die Formänderung**

Formänderung beim Härten

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 34

**Wärmebehandlungsgerechte Konstruktion**

**Keine scharfen Radien!**

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 29

**Einfluß des Chargierens auf die Formänderung**

Formänderung beim Härten

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 12

**Inhalt Block 4**

- 2.10 Verzug
- 2.10.1 Eigenspannungen und deren Ursachen
- 2.10.2 Maßänderung infolge von Wärmebehandlung
- 2.10.3 Formänderung und deren mögliche Ursachen
- 2.11 HÄRTEN UNTER FORMZWANG**
- 2.12 Thermisches Randschichthärten
- 2.12.1 Flammhärten
- 2.12.2 Induktionshärten
- 2.12.3 Laserstrahlhärten
- 2.12.4 Elektronenstrahlhärten

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 35

**Wärmebehandlungsgerechte Konstruktion**

**Symmetrische Konstruktion!**

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 30

**Einfluß des Chargierens auf die Formänderung**

Härten bei krassen Querschnittsunterschieden

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 33

**Härten unter Formzwang - Dornhärten**

Quelle: Heess GmbH

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 35

**Härten unter Formzwang - Vorrichtungen**

Quelle: Heess GmbH

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 37

**Härten unter Formzwang - Karosseriebleche**

Quelle: Kolecik, TU Graz

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 40

**Inhalt Block 4**

- 2.10 Verzug
- 2.10.1 Eigenspannungen und deren Ursachen
- 2.10.2 Maßänderung infolge von Wärmebehandlung
- 2.10.3 Formänderung und deren mögliche Ursachen
- 2.11 Härten unter Formzwang
- 2.12 Thermisches Randschichthärten
- 2.12.1 FLAMMHÄRTEN**
- 2.12.2 Induktionshärten
- 2.12.3 Laserstrahlhärten
- 2.12.4 Elektronenstrahlhärten

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 43

**Härten unter Formzwang - Wellenhärtung**

Quelle: Heess GmbH

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 38

**Inhalt Block 4**

- 2.10 Verzug
- 2.10.1 Eigenspannungen und deren Ursachen
- 2.10.2 Maßänderung infolge von Wärmebehandlung
- 2.10.3 Formänderung und deren mögliche Ursachen
- 2.11 Härten unter Formzwang
- 2.12 THERMISCHES RANDSCHICHTHÄRTEN**
- 2.12.1 Flammhärten
- 2.12.2 Induktionshärten
- 2.12.3 Laserstrahlhärten
- 2.12.4 Elektronenstrahlhärten

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 41

**Flammhärten**

Quelle: Stahlinformationszentrum

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 44

**Härten unter Formzwang Karosseriebleche**

Quelle: Kolecik, TU Graz

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 39

**Thermisches Randschichthärten**

Beim thermischen Randschichthärten wird eine oberflächenschicht lokal austenitisiert und abgeschreckt.

Die martensitische Härtung erfolgt nur im austenitisierten Bereich.

Die Verfahren unterscheiden sich durch die für die Erwärmung verwendeten Energiequellen

- Randschichthärten ohne Veränderung der chemischen Zusammensetzung
  - Flammhärten
  - Induktionshärten
  - Laserstrahlhärten
  - Elektronenstrahlhärten

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 42

**Inhalt Block 4**

- 2.10 Verzug
- 2.10.1 Eigenspannungen und deren Ursachen
- 2.10.2 Maßänderung infolge von Wärmebehandlung
- 2.10.3 Formänderung und deren mögliche Ursachen
- 2.11 Härten unter Formzwang
- 2.12 Thermisches Randschichthärten
- 2.12.1 Flammhärten
- 2.12.2 INDUKTIONSHÄRTEN**
- 2.12.3 Laserstrahlhärten
- 2.12.4 Elektronenstrahlhärten

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 45

**Der Induktionseffekt**

Jeder stromdurchflossene Leiter baut ein Magnetfeld auf.

Feldlinien

Die Feldlinienrichtung kann anhand der „rechten Hand“ oder „Schrauben“-Regel ermittelt werden.

STW03

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 41

**Induktionshärten Induzierter Stromschematisch**

$\delta = f(f)$

100 %

37 %

0,37 ·  $\delta_0$

$\delta_0$

Hohe Frequenz

Niedrige Frequenz

Stromdichte im Werkstück

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 49

**Induktionshärten Grundverfahren und Induktoren**

Ringinduktor Innenfeld: Vorschub - Rotation,  $\eta \approx 0,6 - 0,9$

Ringinduktor Außenfeld: Vorschub - Rotation,  $\eta \approx 0,3 - 0,5$

Gesamflächeninduktor Linearinduktor: Stand- Rotation,  $\eta \approx 0,4 - 0,5$

$\eta =$  Induktorwirkungsgrad

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 52

**Der Induktionseffekt**

Jeder stromdurchflossene Leiter baut ein Magnetfeld auf.

Feldlinien

Die Feldlinienrichtung kann anhand der „rechten Hand“ oder „Schrauben“-Regel ermittelt werden.

STW03

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 47

**Induktionshärten Grundverfahren und Induktoren**

Ringinduktor Innenfeld: Vorschub - Rotation,  $\eta \approx 0,6 - 0,9$

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 50

**Induktionshärten von Zahnrädern**

Allzahnhärtung

Zahnlückenhärtung

Prinzip der Mehrfrequenzhärtung

Wärmebild mit HF

Wärmebild mit MF

Quelle: H. Steik, EFD Induction GmbH

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 53

**Der Induktionseffekt**

Jeder stromdurchflossene Leiter baut ein Magnetfeld auf.

Feldlinien

Die Feldlinienrichtung kann anhand der „rechten Hand“ oder „Schrauben“-Regel ermittelt werden.

STW03

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 41

**Induktionshärten Grundverfahren und Induktoren**

Ringinduktor Innenfeld: Vorschub - Rotation,  $\eta \approx 0,6 - 0,9$

Ringinduktor Außenfeld: Vorschub - Rotation,  $\eta \approx 0,3 - 0,5$

$\eta =$  Induktorwirkungsgrad

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 51

**Härte und Eigenspannungen nach dem Induktionshärten**

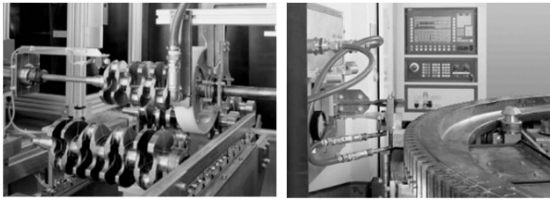
Einfluss des Gefügezustandes auf das Härteprofil beim Induktionshärten

Berechnete und gemessene Eigenspannungen an einer induktiv gehärteten Antriebswelle aus 36MnS

Quelle: K. Störzel, A. Schöpfel, H. Isdeberger: Optimierung der Prozessparameter für induktive Randschichthärtung mit Hilfe numerischer Simulation, HTM 52/1997/2

18. November 2019 DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE Folie 54

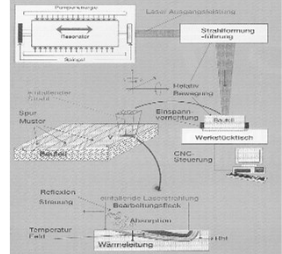
**Induktionshärten**



Lagerhärtung einer Kurbelwelle      Einzelzahnhärtung eines Zahnkrans

18. November 2019      DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE      Folie 55

**Temperaturkontrolliertes Laserstrahlhärten**



18. November 2019      DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE      Folie 59

**Laserstrahlhärten eines Biegewerkzeugs**



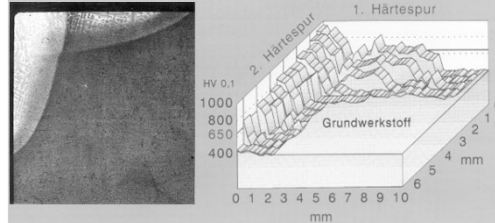
18. November 2019      DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE      Folie 61

**Induktionshärten einer Innenverzahnung**



18. November 2019      DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE      Folie 56

**Laserstrahlhärten eines Stanzwerkzeugs 1.2363 (X100Cr-Mo-V5-1)**



18. November 2019      DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE      Folie 58

**Inhalt Block 4**

- 2.10 Verzug
- 2.10.1 Eigenspannungen und deren Ursachen
- 2.10.2 Maßänderung infolge von Wärmebehandlung
- 2.10.3 Formänderung und deren mögliche Ursachen
- 2.11 Härten unter Formzwang
- 2.12 Thermisches Randschichthärten
- 2.12.1 Flammmhärten
- 2.12.2 Induktionshärten
- 2.12.3 Laserstrahlhärten

**2.12.4 ELEKTROENSTRALHÄRTEN**

18. November 2019      DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE      Folie 62

**Inhalt Block 4**

- 2.10 Verzug
- 2.10.1 Eigenspannungen und deren Ursachen
- 2.10.2 Maßänderung infolge von Wärmebehandlung
- 2.10.3 Formänderung und deren mögliche Ursachen
- 2.11 Härten unter Formzwang
- 2.12 Thermisches Randschichthärten
- 2.12.1 Flammmhärten
- 2.12.2 Induktionshärten
- 2.12.3 LASERSTRAHLHÄRTEN**
- 2.12.4 Elektronenstrahlhärten

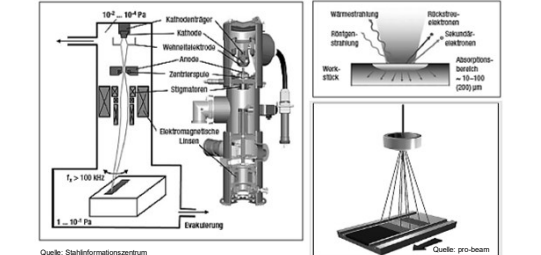
18. November 2019      DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE      Folie 57

**Laserstrahlhärten eines Umformwerkzeugs**



18. November 2019      DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE      Folie 60

**Elektronenstrahlhärten**



Quelle: Stahlinformationszentrum

18. November 2019      DIE WÄRMEBEHANDLUNG METALLISCHER WERKSTOFFE      Folie 63

